Ciencia e Ingeniería
Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías.
Año 2014, Enero-Junio, Vol. (1) N° (1) ISSN 2389-9484.
Universidad de La Guajira, Facultades de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingeniería.
La Guajira-Colombia.
Revista en Línea http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei



MODELADO Y SIMULACIÓN DE TREN ELÉCTRICO DE CORRIENTE CONTINUA, ALIMENTADO POR TERCER RIEL

MODELING AND SIMULATION OF DIRECT CURRENT ELECTRIC TRAIN POWERED BY THIRD RAIL

Sergio Velásquez, Enio Díaz, Dimas Salazar y Ronny Velásquez
Departamento de Ingeniería Eletrónica
UNEXPO-Vicerrectorado de Puerto Ordaz
svelasquez@unexpo.edu.ve

Recibido: Enero 28 de 2014 Aceptado: Mayo 9 de 2014

RESUMEN

La investigación desarrollada presenta el modelado y simulación de un tren eléctrico de corriente continua (CC), alimentado por un tercer riel. El modelado matemático fue realizado utilizando las ecuaciones características que modelan un motor eléctrico de CC, y los resultados se obtuvieron mediante simulación, a través de las herramientas Simulink, Sympowersystems y Symmechanics de MATLAB. La simulación comprendió todo el sistema de carriles de y tracción, modelados mediante resistencias no lineales, y el sistema de propulsión del tren se desarrolló a través del análisis matemático, logrando la obtención de graficas de velocidad, corriente y aceleración, las cuales validaron el sistema propuesto.

Palabras Clave: Tren, Tercer riel, Matlab, Modelado, Simulación.

ABSTRACT

Research has developed modeling and simulation of an direct current electric train (DC), powered by a third rail. Mathematical modeling was performed using the characteristic equations that model a DC electric motor, and the results were obtained by simulation through the Simulink, SymMechanics, SymPowerSystems of MATLAB. The simulation understood the whole system of power and traction rails, modeled by nonlinear resistors, and train propulsion system was developed through mathematical analysis, managing to obtain graphs of speed, power and acceleration, which validated the proposed system.

Keywords: Train, Third rail, Matlab, Modeling, Simulation.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diferentes tipos de trenes, cuya clasificación depende de varias características, como por ejemplo, el uso, el sistema de propulsión de la locomotora y por consiguiente el sistema de alimentación, la distancia recorrida, la velocidad máxima alcanzada, etc. En este caso en particular el objeto de estudio, es un tren que se mueve a lo largo de un conjunto de rieles (carriles de tracción), propulsado por un motor de corriente continua y alimentada por un tercer riel. El sistema de carriles es mostrado en la Figura 1. (Orellano, 2010).

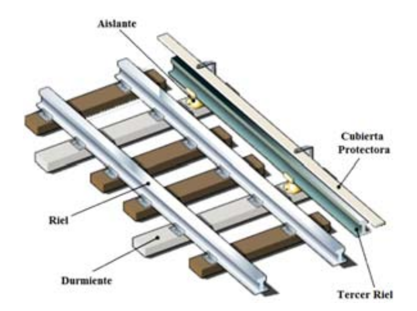


Figura 1. Sistema de carriles

En la Figura 1 puede observarse un tercer riel, el cual es generalmente hecho de acero de alta conductividad, y cuyo propósito es entregar la energía eléctrica necesaria para la tracción del tren. La energía es captada a través de un frotador o patín ubicado a cada costado del bogie motriz (Figura 2). La corriente de tracción se devuelve a la estación de generación a través de los rieles o carriles por donde se traslada el tren (Orellano, 2010).

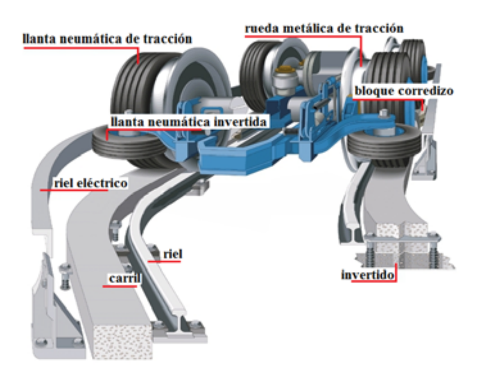


Figura 2. Bogie motriz del motor

El diagrama eléctrico mostrado en la Figura 3, simplifica y modela el sistema de alimentación y propulsión del tren, ya que puede observarse el suministro de voltaje de c.c desde la subestación hasta el motor, a través del tercer riel, y el retorno es realizado mediante el carril de tracción.(Giancolli, 1997)

Como el tren se mueve a lo largo de los rieles de tracción, la resistencia entre la fuente de alimentación y el tren, tanto para el tercer riel como para el carril de tracción, cambia de acuerdo a la posición. De modo que si el tren se mueve lejos de la fuente, la resistencia del riel se incrementará 0,00088Ω cada segundo, modificando con ello el voltaje y la corriente, y en consecuencia la velocidad del tren. Lo que implica que la interacción de propulsión del tren y el riel poseen una geometría no lineal. El resistor “R_0” es la resistencia de cortocircuito de la subestación.

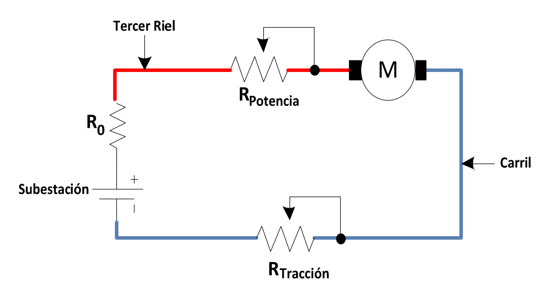


Figura 3. Diagrama esquemático del tren eléctrico

II. DESARROLLO

El objetivo de la investigación desarrollada consistió en modelar y simular un tren eléctrico de corriente continua, reduciendo su modelado básicamente al sistema de propulsión (motor de CC) y a la interacción, no lineal, de los carriles de tracción con el tren. La simulación, por otro lado, incluyó otras características inherentes al tren, como por ejemplo, bloques de control de aceleración, posición, velocidad, etc., todo ello con el fin de obtener un modelo sencillo, pero con la información necesaria para el análisis del tren propuesto.(Barrientos *et al*,2007)

1. MODELADO DE MOTOR DE CC

El modelado matemático de un motor de corriente continua, requiere establecer varias consideraciones, tales como:
1. Flujo magnético constante.
2. Momento de inercia del rotor constante.
3. Parámetros de los circuitos eléctricos constantes.
4. Sistema absolutamente rígido.
5. Reacción del rotor despreciable.
6. Relación lineal entre la velocidad de rotación del rotor y la corriente.
Para determinar las ecuaciones que describen matemáticamente el comportamiento de un motor de CC, véase el diagrama presentado en la Figura 4.

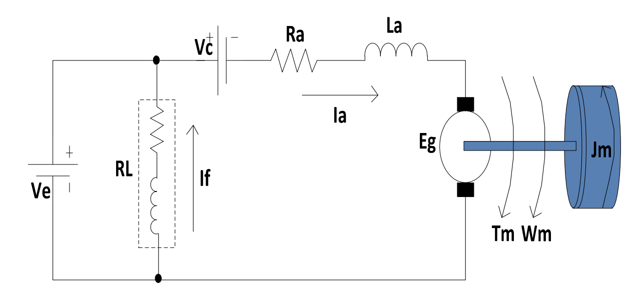


Figura 4. Circuito equivalente de un motor de c.c

En donde:
- V_e: Voltaje de alimentación (V)
- V_c: Voltaje de control de la aceleración (V)
- I_f: Corriente de campo (A)
- RL: Es una carga que representa los servicios auxiliares del tren, luz, calefacción, ventilación, etc.
- I_a: Corriente de armadura (A)

- R_a: Resistencia de armadura (Ω)
- L_a: Inductancia de armadura (H)
- E_g: Fuerza contra electromotriz (V)
- J_m: Inercia de la carga (Kg.m^2)
- T_m: Par del motor (N.m)
- W_m: Velocidad angular (rad/seg)

El circuito mostrado en la Figura 4 evidencia la necesidad de establecer al menos dos ecuaciones, una ecuación eléctrica y una ecuación mecánica. Por una parte, la ecuación mecánica modela principalmente el movimiento del rotor, y por otra parte la ecuación eléctrica modela lo que ocurre en el circuito eléctrico el inducido.

A. *Ecuación eléctrica*

Aplicando ley de Ohm y la ley de voltajes de Kirchhoff, se obtiene la Ec.1 y la Ec.2. (Marks, 2012)

$$V(t) = V_e(t) - V_c(t) \quad \text{Ec.1}$$

$$V(t) - E_g(t) = Ri_a(t) + L\frac{di_a(t)}{d(t)} \qquad \text{Ec.2}$$

B. *Ecuaciones electro-mecánicas*

La fuerza contra electromotriz está relacionada con la velocidad angular (Ver Ec.3), y el torque del motor con la corriente de armadura (Ver Ec.4). Las constantes K_b y K_m, dependen del tamaño y del número de vueltas del rotor y de los detalles de interconexión de estas vueltas. Por ley de la conservación de la energía estas constantes son iguales. (Barrientos *et al*, 2007).

$$E_g(t) = K_b\frac{d\theta_m}{d(t)} \rightarrow E_g(t) = K_b.W_m(t) \quad \text{Ec.3}$$

$$T_m(t) = K_m.i_a(t) \quad \text{Ec.4}$$

C. *Ecuación mecánica*

Para establecer la ecuación mecánica serán consideradas las siguientes fuerzas:
La resistencia al avance debida a la fuerza de gravedad (Ver Ec.5), ésta es igual a la masa (m) por la gravedad (g) por el seno del ángulo de la pendiente o rampa (Chapman,2010).

$$R_{ag} = m.g.sen(\alpha) \quad \text{Ec.5}$$

La fuerza de fricción (Ver Ec.6), la cual es proporcional a la velocidad del tren. B es el coeficiente de fricción viscosa entre el rotor y el estator.

$$F_r = B\frac{d\theta}{dt} \quad \text{Ec.6}$$

La fuerza de arrastre del aire o arrastre cuadrático (Ver Ec.7), generado por el movimiento del tren a alta velocidad a través del aire. Proporcional al cuadrado de la velocidad. (Railroad, 2007).

$$F_{drag} = C\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 \quad \text{Ec.7}$$

Relacionando las Ec.4, Ec.5, Ec.6 y Ec.7 se obtiene la ecuación mecánica del motor (Ver Ec.8).

$$F_m = T_m - R_{ag} - F_r - F_{drag} \quad \text{Ec.8}$$

Para calcular, la aceleración se emplea la Ec.9, sobre la fuerza obtenida en la Ec.8

$$a = F_m \frac{1}{m_{Total_tren}} \quad \text{Ec.9}$$

Riel de Potencia Oeste SS2 para Tren NLineal Resistancia
Riel de Potencia Este SS3 para Tren NLineal Resistancia
R2
R2Corriente
R4Corriente
R4
Riel 2 de Potencia
Riel 1 de potencia
Supply R1
Supply R2
Tren
[Accel_Cmd]
[Slope_Accel]
AcAccel. Cmd.
State x
F Ext. Forces
Current i
States
Tren_Corriente
Supply R3
Supply R4
Subestacion1
Subestacion2
Subestacion3
Subestacion4
R1Corriente
R1
R3
R3Current
Riel 2 de Tracción
Riel 1 de Tracción
Riel de Tracción Oeste SS2 para Tren NLineal Resistancia
Riel de Tracción SS3 para Tren NLineal Resistancia
Localización Pos1 = 42543 ft.
Localización Pos 2 = 47543 ft.
Movimiento del Tren
Localización Pos3 = 55543 ft.
Localización Pos4 = 60543 ft.

Figura 6 presenta la simulación realizada en Simulink

SIMULACIÓN DE TREN ELECTRICO DE C.C

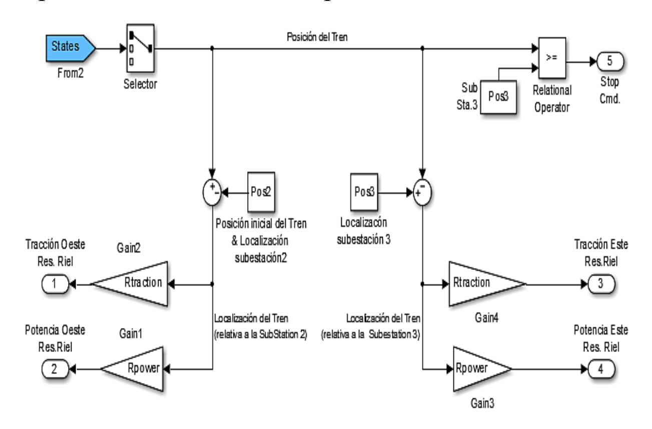
La Figura 6 presenta la simulación realizada en Simulink. Nótese que es la implementación del circuito mostrado en la Figura 3, donde las subestaciones están representadas con fuentes de tensión DC, los carriles con resistencias no lineales, y un bloque principal, denominado "Tren", que contiene la simulación del motor de corriente continua (Velásquez y Velásquez,2014).

A. Subestaciones.

Con frecuencia, el tercer riel es empleado para valores de hasta 1.000 Vdc, por lo que las subestaciones tienen un valor de 1050Vdc, y la distancia recomendada entre subestaciones para este valor es de aproximadamente 10Km (32800pies)(Barrientos et al.,2007).

B. Carriles de potencia y tracción

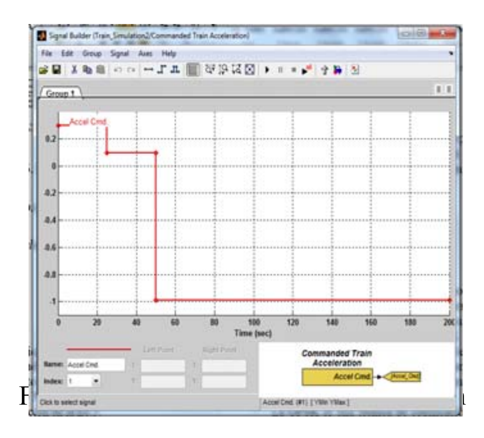
La resistencia media del carril, $R_{media}(x)$ Ω/Km, exhibe un comportamiento exponencial decreciente, de tal forma que aumenta en función de la longitud del circuito de tracción, x. Sin embargo, para simplificar el modelo (Figura 7), a la hora de calcular las corrientes inyectadas en el carril en condiciones normales y de cortocircuito, se supondrá que la resistencia de los carriles tendrá un comportamiento determinado por la Ec.8.



$$R_{media_aprox}(x) = (Pos_{actual} - Pos_{subEst})R_{Pot_o_tracc} \text{Ec.10}$$

C. *Control de aceleración del tren*

Para el control de la aceleración del tren se utiliza una herramienta de Simulink "Signal builder", el cual permite establecer una aceleración de referencia o setpoint, por periodos de tiempo determinados (Hyperphysics, 2013).



D. *Ruta trazada para el tren eléctrico*

Al igual que en el control de aceleración se emplea la herramienta "Signal Builder", pero con la diferencia de representar el trazado o la ruta por la cual transita el tren (Ver Figura 9). A estos valores se le suma una constante de arrastre, el cual se emplea para cuantificar la resistencia del tren en un medio como el aire (Donald, 1984; Rena, 2012)

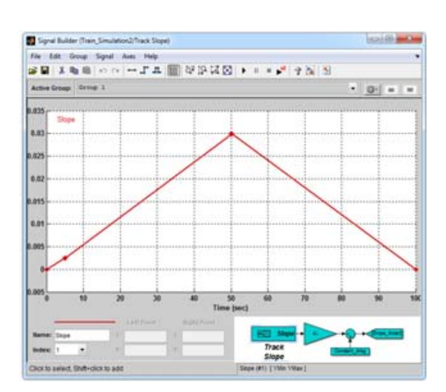


Figura 9. Control de ruta trazada para el tren

E. *Tren (Simulink-Simpowersystem)*

La Figura10 muestra el modelo desarrollado para la simulación del motor de c.c., tomando en consideración las ecuaciones obtenidas en el modelado matemático (Ferropedia, 2012; Velásquez y Velásquez, 2014).

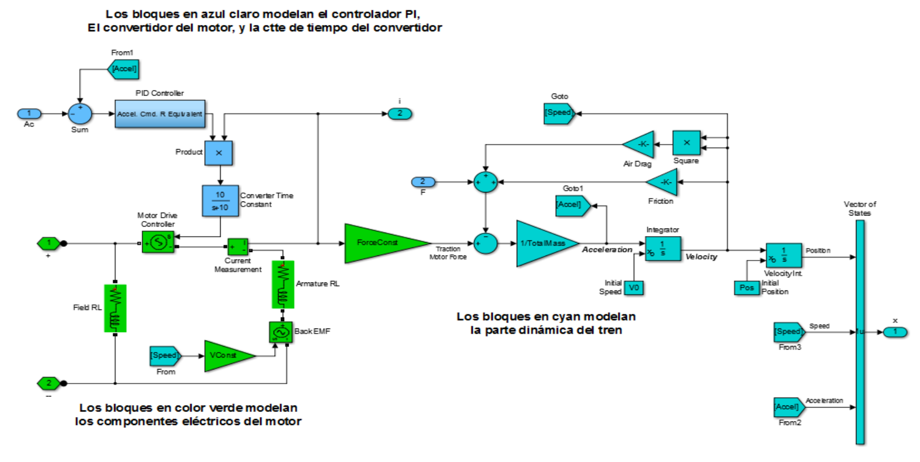


Figura 10. Simulación del motor de c.c.

En el diagrama mostrado en la Figura 10 se presentan tres áreas principales:
1. En azul, el control de aceleración del tren, el cual está constituido por un controlador proporcional integral (PI), y un inversor de constante de tiempo (Figura 11).

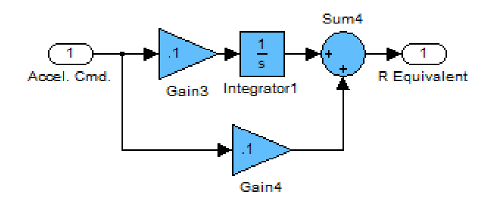


Figura 11. Controlador PI.

2. En verde, el circuito eléctrico del motor DC, en éste se puede observar la fuerza contra electromotriz (FEM), y una carga, Field RL, en paralelo con la armadura del motor y la FEM. Ésta carga representa la iluminación, calefacción, ventilación y aire acondicionado del tren. [11]
3. En color cian, la dinámica de movimiento del tren, en el cual se suman la fuerza de gravedad (F_g), la fuerza de fricción (F_r) y la fuerza de arrastre (F_{ar}). La diferencia entre la suma de estos parámetros que se oponen al movimiento del tren, con el par motor, da como resultado una fuerza. Al aplicar la segunda ley de Newton (F=m.a), se obtiene la aceleración del tren, la cual es realimentada hacia el controlador PI. (Ferropedia, 2012; Centrodeartigo, 2013)

F. Tren (Simulink-Simmechanics)

La simulación desarrollada en Simmechanics, solo afecta al bloque denominado "Tren"; las características de control de ruta y aceleración se mantienen iguales. La Figura 12, muestra la implementación realizada.

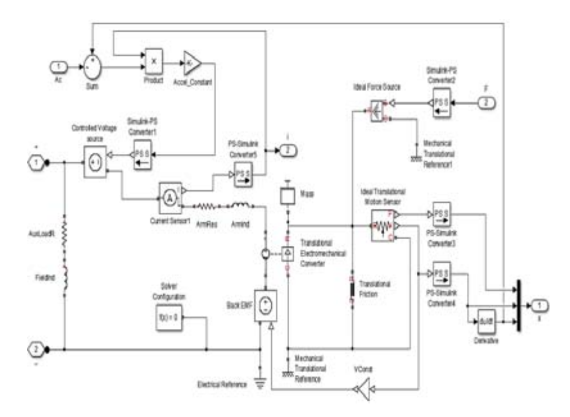


Figura 12. Par del motor en función del tiempo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Es fácilmente observable, en las gráficas mostradas en la Figura 13, que la corriente (I) de los rieles de tracción y potencia, ubicados al "Oeste", disminuye a medida que el tren se desplaza hacia el "Este", debido al incremento de las resistencias de ambos carriles; ocurre de forma contraria con la corriente de los carriles que están hacia el "Este", a medida que el tren se acerca a estas subestaciones, la resistencia disminuye y por lo tanto la corriente aumenta.

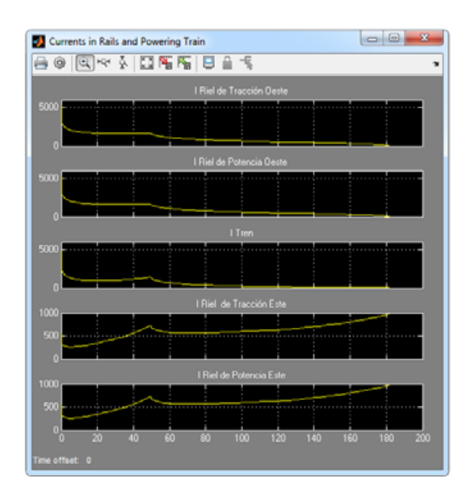


Figura 13. Gráfica de I vs tiempo (carriles y tren).

La Figura 14 representa los valores de resistencia no lineal como una función del tiempo. En ésta gráfica aplica la misma explicación expuesta para la Figura 12, donde los carriles ubicados al Oeste tienen una pendiente positiva y los del Este una pendiente negativa, de acuerdo al desplazamiento del tren.

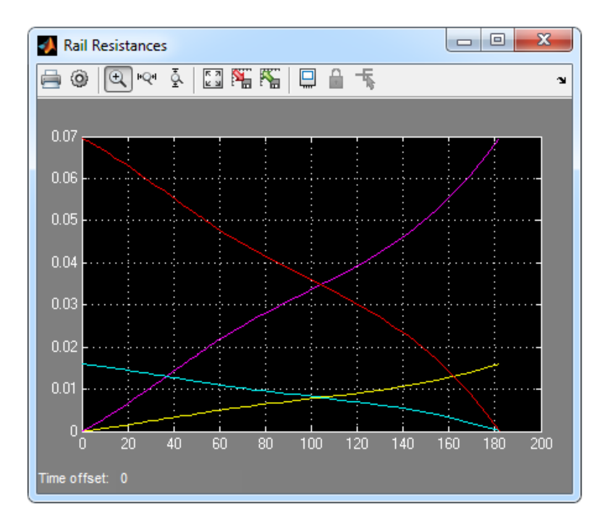


Figura 14. Resistencia de los rieles de potencia y tracción.

El par del motor en función del tiempo, se muestra en la Figura 15, en ésta se puede observar un par de arranque elevado, necesario para superar el par resistente y generar una aceleración angular.

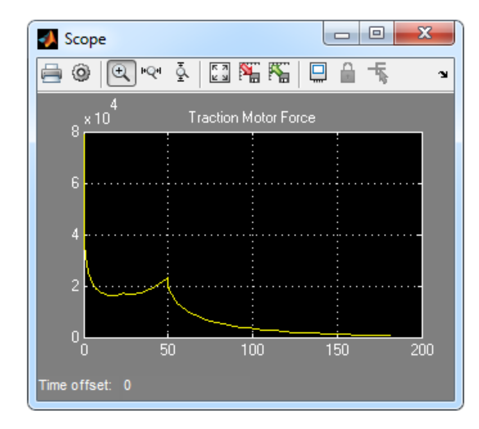


Figura 15. Par del motor en función del tiempo.

La primera gráfica que se observa en la Figura 16, es la ruta transitada por el tren eléctrico, y las dos gráficas en la parte inferior corresponden a la velocidad y a la aceleración respectivamente. Cuando la pendiente es positiva, la velocidad es aprox. constante, y cuando es negativa el tren aumenta su velocidad, obteniéndose un comportamiento que emula de manera significativa a la realidad.

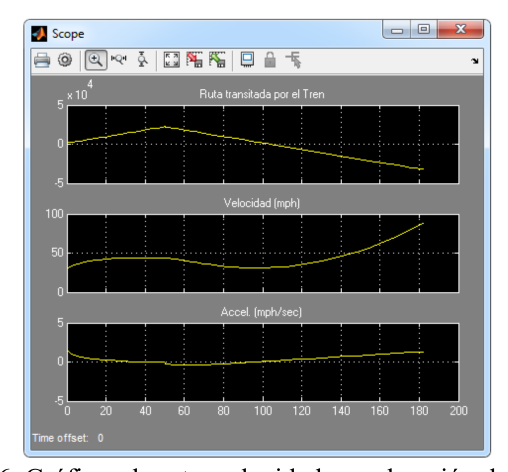


Figura 16. Gráficas de ruta, velocidad y aceleración del tren

IV. CONCLUSIÓN

Después de finalizado el proyecto de modelado y simulación de un tren eléctrico de corriente continua, es posible concluir lo siguiente:

Se logró simular y probar el diseño del tren eléctrico utilizando las herramientas Simulink, Simpowersystem y Simmechanics de Matlab.

Las gráficas obtenidas validan la simulación realizada del tren eléctrico, ya que estas reflejan características de funcionamiento ampliamente estudiadas, como por ejemplo, un par de arranque elevado, una velocidad que depende, entre otras cosas, de la resistencia al avance en pendiente o en rampa, obviamente en rampa se incrementa y en pendiente se reduce; de igual forma las gráficas de las corrientes de los carriles, certifican lo que dice la teoría de trenes eléctricos alimentados por un tercer riel.

Aun cuando el modelado y simulación del tren eléctrico fue realizado siguiendo una estandarización en el número de vagones y usuarios, es importante señalar que el sistema de cargas de un tren posee una geometría variable, por lo que es, sin duda alguna, el principal problema para dimensionar un modelo como el estudiado en este paper.

Es necesario destacar, de igual forma, la relevancia que tiene la distancia entre subestaciones, ya que está implícitamente ligada al voltaje que provee la subestación y por consiguiente a las pérdidas generadas por los carriles de tracción y potencia.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

O. A., Aerodynamics of high speed trains., Estocolmo. , 2010..

D. C. Giancolli, "FISICA, Principios con Aplicaciones", Mexico: Prentice-Hall, 1997.

A. Barrientos, L. Peñin y R. Aracil, Fundamentos de Robotica, Madrid: McGraw, 2007.

M. Marks., Manual del Ingeniero Mecánico., New York: Mc Graw Hill, 2012.

C. S., Fundamentos de Máquinas Eléctricas., New York: McGraw Hill, 2010.

B. C. Railroad, transportation energy efficiency. Illinois railroad engineering program., 2007.

R. V. Sergio Velasquez, Fundamentos de Analisis Numèrico, Guayana: Autores y Editores, 2014.

http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/, «http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/mechanics/quadrag.html,» 1 12 2013. [En línea]. Available: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/mechanics/quadrag.html. [Último acceso: 12 1 2014].

http://www.rena.edu.ve/cuartaEtapa/fisica/Tema7b.html, «http://www.rena.edu.ve/cuartaEtapa/fisica/Tema7b.html,» 1 12 2012. [En línea]. Available: http://www.rena.edu.ve/cuartaEtapa/fisica/Tema7b.html. [Último acceso: 1 12 2013].

www.ferropedia.es, «http://www.ferropedia.es/,» 11 1 2012. [En línea]. Available: http://www.ferropedia.es/wiki/Bogie. [Último acceso: 22 1 2014].

H. W. B. C. J. Donald G. Fink, Manual práctico de electricidad para ingenieros, New York: McGraw Hill, 1984.

centrodeartigo.com, «http://centrodeartigo.com/articulos-utiles/,» 11 12 2013. [En línea]. Available: http://centrodeartigo.com/articulos-utiles/article_119825. [Último acceso: 13 1 2014].